

УДК 621.785.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ СРЕД

*Кандидаты техн. наук ГАЛЫНСКАЯ Н. А., КУХАРЕВА Н. Г.,
инж. ПЕТРОВИЧ С. Н., канд. техн. наук БАБУЛЬ Т., инж. ОБУХОВИЧ З.*

*Белорусский национальный технический университет,
Институт прецизионной механики (Варшава, Польша)*

Статистический анализ показывает, что главной причиной выхода из строя машин является не их поломка, а износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием сил трения. При трении происходят коренные изменения приповерхностного объема материала соприкасающихся подвижных сопряжений, которые и определяют процесс износа. В связи с этим в ряде случаев поверхностное упрочне-

ние путем нанесения термодиффузионных покрытий может являться весьма эффективным способом решения данной проблемы. Одним из способов поверхностного упрочнения, нашедшим использование в промышленности, является борирование в порошковых смесях. В процессе борирования в поверхностных слоях упрочняемого изделия формируется зона боридов железа, обладающая высокой твердостью

и износостойкостью. Кроме того, коэффициент трения боридных слоев и склонность к схватыванию (образованию металлической связи) в контакте с холодными металлами при их взаимном перемещении значительно ниже, чем у закаленных сталей. Поэтому борирование значительно повышает износостойкость пар трения, работающих без смазки или с ограниченной ее подачей.

Цель данной работы – исследование и сравнительный анализ износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред.

Методика исследований. Порошковые среды получали алюмотермическим восстановлением шихтовой смеси, проходившим с протеканием СВС процесса, в специальных ретортах внепечным способом.

Восстановленную смесь размалывали, просеивали, обеспечивая требуемый гранулометрический состав (0,3–0,5 мм²), и для дальнейшего использования при термодиффузионном насыщении добавляли активаторы KBF₄ и AlF₃.

Процесс борирования проводили в шахтных

печах с силитовыми нагревателями в контейнерах из жаростойких сталей или сплавов. Герметизацию контейнера осуществляли плавким затвором на основе борного ангидрида. Насыщение углеродистой стали 20 осуществляли при температуре 950 °С в течение 4 ч.

Испытания на износ проводили по двум методикам:

- с использованием трехвалкового метода (польский стандарт PN-83/h-04302);
- по методу Амслера.

В первом случае исследования выполнены с применением четырех уровней удельной нагрузки – 50; 100; 200; и 400 МПа. Скорость вращения $v = 0,56$ м/с, время $t = 100$ мин, путь трения $S = 3470$ м. Для смазки использовали масло марки SAE30, подаваемое со скоростью 30 кап./мин.

По методу Амслера испытания на износ проведены в паре системы образец – диск (контртело) с помощью машины AMSLER A-135. Технические чертежи образцов и контртела представлены на рис. 1, 2, пары в сборе – на рис. 3.

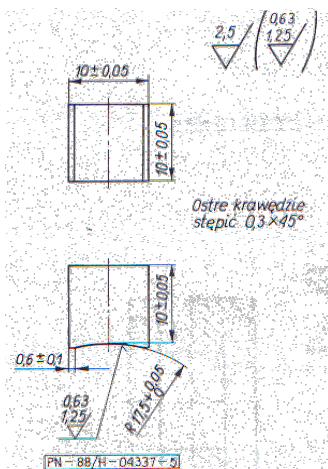


Рис. 1. Образец для испытаний на износ

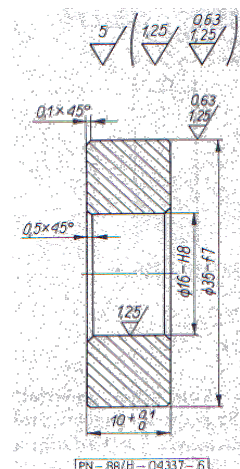


Рис. 2. Контртело для испытаний на износ

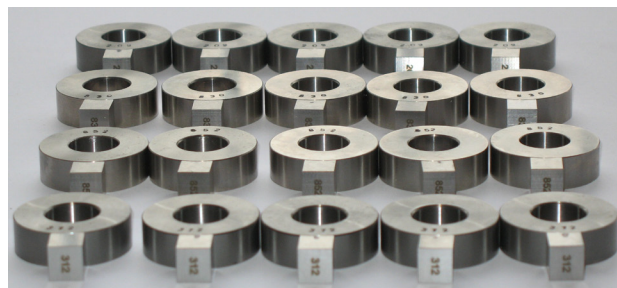


Рис. 3. Комплект образцов для испытаний на износ

При испытании с помощью машины AMS-LEER A-135 определяли износ по массе образца, контртела, их суммарный износ, а также коэффициент трения. Расчет среднего коэффициента трения μ_{sr} а также коэффициента трения в каждом эксперименте μ_{ch} проводили по следующим формулам:

$$\mu_{sr} = \frac{A}{\pi P D n_c},$$

где A – работа трения для всего пути трения в эксперименте, Н·м; P – прилагаемая нагрузка, Н; D – диаметр контртела, м; n_c – целое число оборотов вращающегося элемента в одном эксперименте;

$$\mu_{ch} = \frac{Z M_t}{P D},$$

где M_t – момент трения, Н·м; P – прилагаемая нагрузка, Н; D – диаметр контртела, м.

Результаты исследований. Термодиффузионную обработку образцов для испытаний на износ проводили в разработанных авторами данной работы порошковых борирующих смесях (№ 1–8), полученных методом внепечной металлотермии и подробно изученных в работе [1]. Составы насыщающих сред и характеристики диффузионных слоев, формирующиеся из них на стали 20, представлены в табл. 1. В составе № 9 – традиционная борирующая смесь, полученная печным способом. Следует отме-

тить, что смесь № 9 оказалась нетехнологичной вследствие ее высокой спекаемости.

Металлографические и дюротметрические исследования диффузионных слоев из разработанных смесей показали их аномальность. Во-первых, по толщине боридные слои, образованные в смесях, содержащих чистые металлы и их окислы, в 1,2–1,8 раза превосходят слои, полученные в традиционных алюмотермических смесях и смесях на основе карбида бора. Во-вторых, микротвердость на границе фаз практически не изменяется, оставаясь на уровне значения высшего бориды (табл. 1), а в некоторых случаях (смеси № 7–8) в области низкобористой фазы (по центру слоя) она даже повышается до 20000–21400 МПа. Результаты микрорентгеноспектрального анализа показали, что содержание бора (до 35 мас. %) в слоях, сформированных из разработанных смесей, превышает его содержание в высшем бориде FeB. Из анализа диаграммы Fe–B следует, что в данной системе в области содержания бора более 50 ат. %, что соответствует 16,2 мас. %, образуется ряд высокобористых твердых растворов на основе решетки β -ромбического бора с микротвердостью, превышающей 20000 МПа [2, 3]. По всей вероятности, выявленные аномалии могут оказывать существенное влияние на трибологические свойства исследуемых боридных покрытий.

Таблица 1

Влияние состава порошковых сред на толщину, микротвердость и соотношение фаз в боридных слоях

| № | Состав реакционной смеси (мас. %) | Фазовый состав и толщина слоя, мкм | | |
|---|---|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Общая | FeB | Fe ₂ B |
| 1 | 22 % Al ₂ O ₃ + 15 % Cr ₂ O ₃ + 26 % B ₂ O ₃ + 28 % Al + 6 % NiO + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 200 | 60 (12900–18900) | 140 (11700–16800) |
| 2 | 25 % Al ₂ O ₃ + 15 % Cr ₂ O ₃ + 25 % B ₂ O ₃ + 27 % Al + 5 % Ni + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 240 | 60–80 (10200–18900) | 180–160 (11700–17800) |
| 3 | 8 % Al ₂ O ₃ + 9 % Cr ₂ O ₃ + 23 % B ₂ O ₃ + 22 % Al + 10 % NiO + 25 % Fe + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 140–160 | 0 | 140–160 (10600–15100) |
| 4 | 12 % Al ₂ O ₃ + 9 % Cr ₂ O ₃ + 23 % B ₂ O ₃ + 22 % Al + 6 % CuO + 25 % Fe + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 140–160 | 0 | 140–160 (11700–18900) |
| 5 | 24 % Al ₂ O ₃ + 15 % Cr ₂ O ₃ + 25 % B ₂ O ₃ + 28 % Al + 5 % WO ₃ + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 240 | 40 (15100–17800) | 200 (10200–18900) |
| 6 | 24 % Al ₂ O ₃ + 15 % Cr ₂ O ₃ + 25 % B ₂ O ₃ + 28 % Al + 5 % Fe ₂ O ₃ + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 320 | 120–160 (12900–15100) | 200–160 (10000–18200) |
| 7 | 22 % Al ₂ O ₃ + 15 % Cr ₂ O ₃ + 26 % B ₂ O ₃ + 6 % CuO + 28 % Al + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 380–400 | 220–300 (12900–20100) | 80–180 (13100–20100) |
| 8 | 24 % Al ₂ O ₃ + 15 % Cr ₂ O ₃ + 25 % B ₂ O ₃ + 28 % Al + 5 % MoO ₃ + 3 % ZrO ₂ Микротвердость, МПа | 260–320 | 120 (11700–21400) | 140–200 (13800–18900) |

| | | | | |
|---|---|-----|-------------|--------------|
| 9 | 42 % B_2O_3 + 28 % Al + 30 % Al_2O_3 Микротвердость, МПа | 210 | 80 16800 | 130 12900 |
|---|---|-----|-------------|--------------|

На рис. 4–11 представлены результаты испытаний на износ трехвалковым методом образцов стали 20 с боридными покрытиями, полученными в насыщающих смесях разработанных восьми составов, на рис. 12 – в традиционной смеси, полученной печным методом. При испытаниях с прилагаемой нагрузкой 50 и 100 МПа в течение

заданного времени испытаний (100 мин) все образцы подвергались равномерному изнашиванию. Так, при нагрузке 50 МПа минимальный износ – 5; 7 и 8 мкм – показали образцы, обработанные соответственно в смесях № 7, 8 и 6. Износ образцов, обработанных в смесях № 1–5, составил 9–11 мкм.

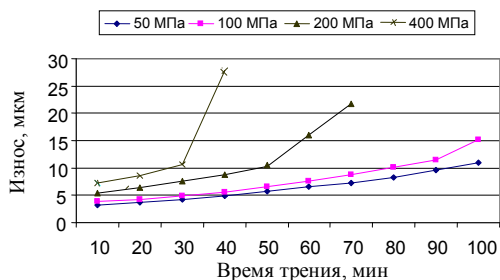


Рис. 4. Износ стали 20, борированной в смеси № 1 (22 % Al_2O_3 + 15 % Cr_2O_3 + 26 % B_2O_3 + 28 % Al + 6 % NiO + 3 % ZrO_2)

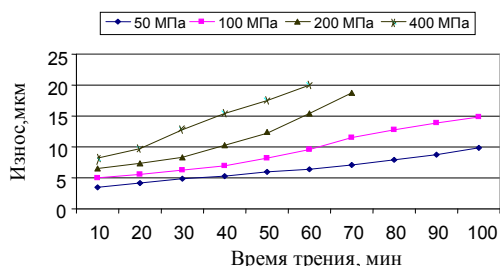


Рис. 6. Износ стали 20, борированной в смеси № 3 (8 % Al_2O_3 + 9 % Cr_2O_3 + 23 % B_2O_3 + 22 % Al + 10 % NiO + 25 % Fe + 3 % ZrO_2)

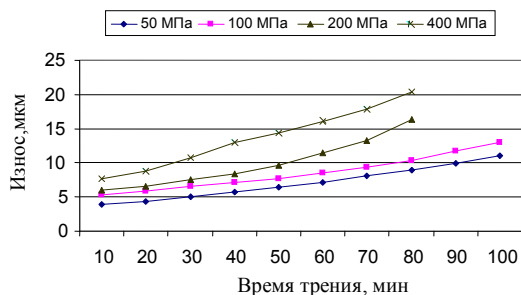


Рис. 8. Износ стали 20, борированной в смеси № 5 (24 % Al_2O_3 + 15 % Cr_2O_3 + 25 % B_2O_3 + 28 % Al + 5 % WO_3 + 3 % ZrO_2)

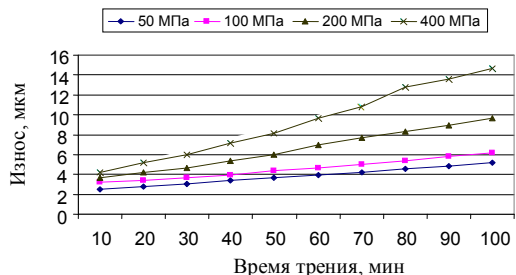


Рис. 10. Износ стали 20, борированной в смеси № 7

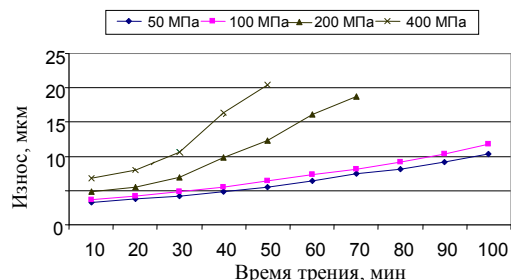


Рис. 5. Износ стали 20, борированной в смеси № 2 (25 % Al_2O_3 + 15 % Cr_2O_3 + 25 % B_2O_3 + 27 % Al + 5 % Ni + 3 % ZrO_2)

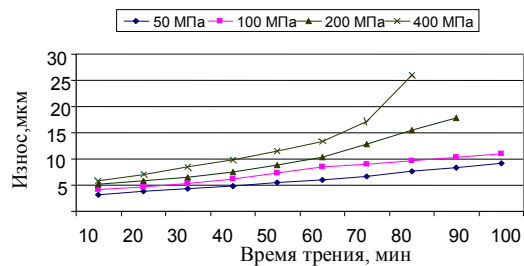


Рис. 7. Износ стали 20, борированной в смеси № 4 (12 % Al_2O_3 + 9 % Cr_2O_3 + 23 % B_2O_3 + 22 % Al + 6 % CuO + 25 % Fe + 3 % ZrO_2)

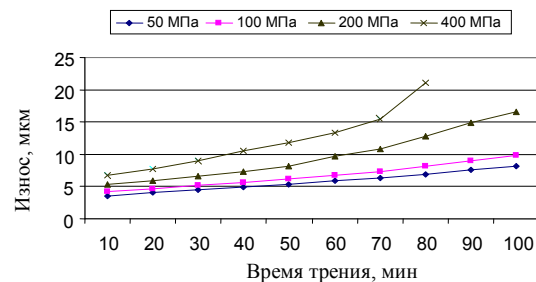


Рис. 9. Износ стали 20, борированной в смеси № 6 (24 % Al_2O_3 + 15 % Cr_2O_3 + 25 % B_2O_3 + 28 % Al + 5 % Fe_2O_3 + 3 % ZrO_2)

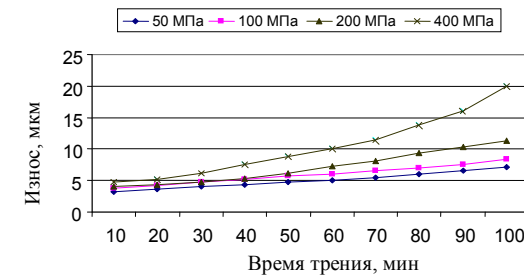


Рис. 11. Износ стали 20, борированной в смеси № 8

(22 % Al_2O_3 + 15 % Cr_2O_3 + 26 % B_2O_3 + 28 % Al + 6 % CuO + 3 % ZrO_2)

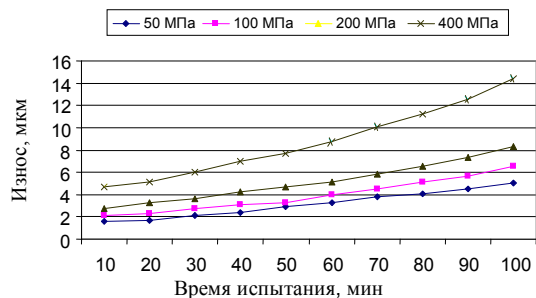


Рис. 12. Износ стали 20, борированной в смеси № 9 (42 % B_2O_3 + 28 % Al + 30 % Al_2O_3)

С повышением удельной нагрузки до 100 МПа характер износа не изменился, его показатели составили 6,0, 7,5 и 9,5 мкм соответственно для смесей № 7, 8 и 6, для смесей № 1–5 – 11–15 мкм.

Повышение удельной нагрузки до 200 и 400 МПа привело к увеличению скорости изнашивания и выходу некоторых образцов из строя. Вышедшим из строя считался образец, износ которого достигал 20 мкм.

Так, при использовании нагрузки 200 МПа образцы, обработанные в смесях № 1–3, вышли из строя через 70 мин, в смеси № 5 – через 80 мин, а в смеси № 4 – через 90 мин испытания.

Для испытаний, проведенных при удельной нагрузке 400 МПа, была отмечена еще более высокая скорость износа, при которой образцы, обработанные в смесях № 1–3, разрушились через 40–60 мин испытаний, в смесях № 4–6 – через 80 мин. Максимальную стойкость показали образцы, упрочненные в смесях № 7, 8.

На рис. 13 представлены гистограммы сравнительных результатов испытаний на износ образцов, обработанных в насыщающих смесях разработанных составов, с учетом прилагаемой нагрузки за время испытания – 100 мин. Из полученных данных видно, что состав насыщающих сред оказывает существенное влияние на износостойкость формирующихся из них боридных покрытий. Так, введение в состав насыщающей смеси оксидов меди CuO и молибдена MoO_3 приводит к формированию покрытий с высоким сопротивлением износу. По мнению авторов, такое повышение износостойкости покрытий может быть связано с вышеотмеченными особенностями фазообразования формирующихся диффузионных слоев.

Образцы, обработанные в традиционной борировочной смеси № 9, полученной печным спо-

(24 % Al_2O_3 + 15 % Cr_2O_3 + 25 % B_2O_3 + 28 % Al + 5 % MoO_3 + 3 % ZrO_2)

собом, показали результаты испытаний на износ, аналогичные результатам образцов, обработанных в разработанной смеси № 7. Однако смесь № 9 в силу своей нетехнологичности и неэкономичности не рекомендуется для промышленного использования.

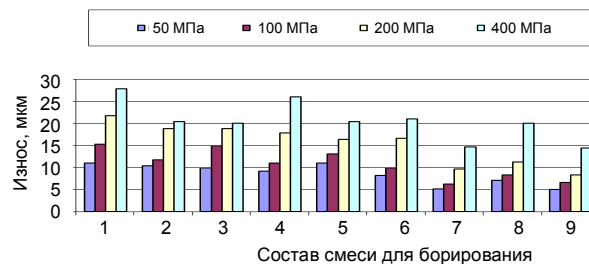


Рис. 13. Износостойкость боридных покрытий за 100 мин испытаний

При исследовании антифрикционных свойств на установке «Амслер» образец и диск (контртело) проходили одинаковую обработку – борирование в порошковых смесях составов № 1, 3–9. Образец фиксировался неподвижно, а диск вращался в соприкосновении с ним со скоростью 200 об/мин. Нагрузка составляла 25 и 50 даН. Во время испытания определялись износы образца, контртела, а также их суммарный износ. На рис. 14, 15 представлены данные суммарного износа образца и контртела, борированных в разработанных смесях, в течение 6 ч испытаний. По результатам исследований максимальную износостойкость при обеих прилагаемых нагрузках имеют однофазные боридные покрытия, формирующиеся в порошковых смесях № 4 и 3. Тот же уровень износостойкости показали двухфазные слои, полученные из насыщающих смесей № 5 и 6. При малой нагрузке им незначительно уступают слои, полученные из смесей № 7 и 8. Наиболее подвержены изнашиванию диффузионные слои, формирующиеся в смеси № 1 вне зависимости от прилагаемой нагрузки.

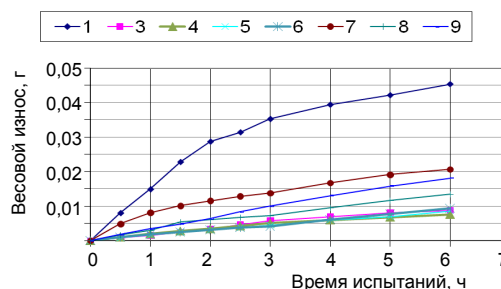


Рис. 14. Износ стали 20 (образец + контртело), борированной в смесях № 1–9; нагрузка – 25 даН

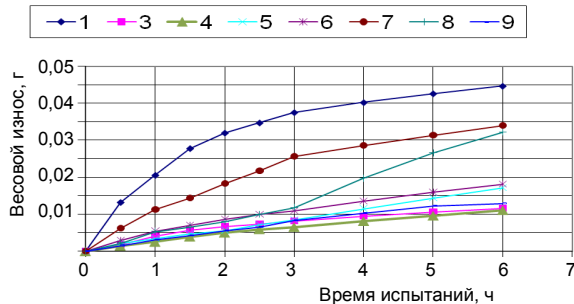


Рис. 15. Износ стали 20 (образец + контртело), борированной в смесях № 1–9; нагрузка – 50 даН

На рис. 16 представлены рассчитанные по данным проведенных испытаний коэффициенты трения боридных покрытий, полученных из исследуемых смесей.

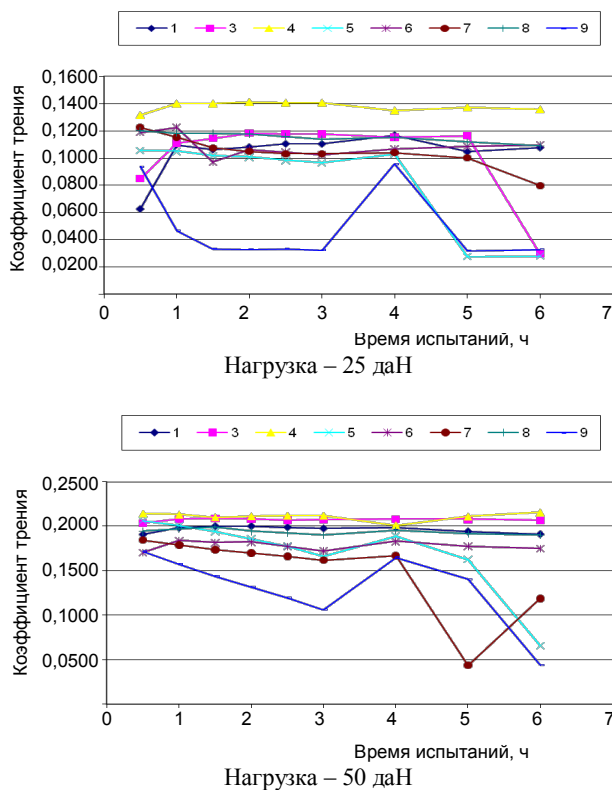


Рис. 16. Коэффициент трения стали 20, борированной в порошковых смесях № 1–9

Минимальное значение коэффициента трения при всех прилагаемых нагрузках имеют двухфазные покрытия, формирующиеся из смесей № 5 и 7. Практически в течение всего времени испытаний значение коэффициента трения

для всех испытуемых покрытий, полученных из смесей № 1–8, находится в узком диапазоне значений: при нагрузке 25 даН – 0,095–0,14, при нагрузке 50 даН – 0,15–0,22. В случае использования для борирования традиционной смеси № 9 коэффициент трения в зависимости от времени изнашивания изменяется скачкообразно, имея при этом минимальное значение. Аналогично изменяется и твердость по толщине диффузионного слоя (на границе боридных фаз), формирующегося из этой смеси. Возможно, что эти два показателя взаимосвязаны.

Характер изменения коэффициента трения для композиционных покрытий из разработанных порошковых сред, очевидно, более предпочтителен для контактирующих поверхностей, что указывает на стабильность системы.

Что касается численных значений коэффициента трения покрытий из разработанных боридных сред, то они соизмеримы со значениями для покрытий, формирующихся при азотировании и цементации.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа результатов испытаний на износ, проведенных трехвалковым методом, установлено, что состав насыщающих сред оказывает существенное влияние на износостойкость формирующихся из них боридных покрытий. Отмечено значительное повышение сопротивления износу диффузионных слоев, полученных из смесей, содержащих оксиды меди CuO и молибдена MoO_3 . Эти насыщающие смеси целесообразно применять для обработки деталей, работающих в условиях тяжелого нагружения. Для упрочнения деталей, работающих в условиях небольших удельных нагрузок, могут быть рекомендованы насыщающие среды практически всех разработанных составов.

2. Образцы, обработанные в традиционной боридной смеси № 9, полученной печным способом, показали высокую износостойкость, однако данная смесь в силу своей нетехнологичности и неэкономичности (печное восстановление) не рекомендуется для промышленного использования.

3. При исследовании антифрикционных свойств на установке «Амслер» максимальную износостойкость показали однофазные боридные покрытия, формирующиеся в порошковых смесях № 4 и 3. Тот же уровень износостойкости имеют двухфазные слои из насыщающих смесей № 5 и 6, а при малой нагрузке также двухфазные слои из смесей № 7–8.

4. Рассчитанные по данным проведенных испытаний значения коэффициента трения боридных покрытий из разработанных составов находятся в узком диапазоне значений: при нагрузке 25 даН – 0,095–0,14, при нагрузке 50 даН – 0,15–0,22, что соизмеримо со значени-

ями для покрытий, получаемых при азотировании и цементации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Badania* wpływu składu proszków na strukturę i budowę fazową warstw borowanych dyfuzyjnie / N. G. Kuchrieva [et al] // *Inżynieria powierzchni* – 2010. – № 4. – С. 49–58.
2. **Портной, К. И.** Бинарные диаграммы состояния ряда элементов с бором / К. И. Портной, В. М. Ромашов // *Порошковая металлургия*. – 1972. – № 5. – С. 48–56.
3. **Портной, К. И.** Диаграмма состояния Fe-B / К. И. Портной, М. Х. Левинская, В. М. Ромашов // *Порошковая металлургия*. – 1969. – № 8. – С. 66.

Поступила 25.04.2011

УДК 620.172:620.178

ОСОБЕННОСТИ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ПЕЧНОГО И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*Член-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ПАНТЕЛЕЕНКО Ф. И.,
канд. техн. наук, доц. СНАРСКИЙ А. С., канд. техн. наук КРЫЛЕНКО А. В.*

Белорусский национальный технический университет

Вопросы надежной эксплуатации различного ответственного оборудования и конструкций были и остаются актуальными. Разработан ряд эффективных методик неразрушающего контроля, позволяющих оценить состояние металла указанных металлических объектов без вырезки образцов из конструкции. Собственными исследованиями установлена возможность и эффективность неразрушающей оценки механических свойств стальных конструкций косвенным методом: по эмпирическим формулам, связывающим параметры отпечатка пирамидального индентора с основными характеристиками механических свойств (пределом прочности, пределом текучести, относительными удлинением и сужением, а также ударной

вязкостью) [1]. Метод хорошо зарекомендовал себя для основных марок конструкционных сталей, используемых для изготовления различных ответственных металлоконструкций. При этом возможность применения переносных твердомеров, позволяющих определять твердость по Виккерсу и соответственно указанные выше механические свойства непосредственно на конструкции без вырезки образцов из нее, делает его действительно эффективным неразрушающим методом контроля. Наряду с указанным методом для неразрушающего определения фактического состояния металла широко используется и полевая металлография, методология которой состоит в оценке структуры материала и степени ее деградации непосред-